

인장시험에 의한 대변형률 유효응력 예측

Determination of Flow Stress at Large Plastic Strain by Tensile Test

*#강성훈¹, 이승윤¹, 이영선¹, 김병민², 김준현³

*#S. H. Kang¹(kangsh@kims.re.kr), S. Y. Lee¹, Y. S. Lee¹, B. M. Kim², J. H. Kim³

¹ 한국기계연구원 부설 재료연구소 융합공정연구본부, ² 부산대학교 기계공학과, ³ 삼우기업주

Key words : Flow stress, Large plastic strain, Tensile test, Ductile fracture, Annealing temperature

1. 서론

최근 컴퓨터를 이용한 해석기술의 발전은 다양한 산업 분야에서 요구되는 부품 및 공정 설계의 효율화를 앞당기고 있다. 이러한 해석 기술의 신뢰성은 초기 입력 데이터의 정확성에서 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 특히 소성 가공에서의 유효응력 (flow stress)은 초기 소재 및 성형 부품의 기계적 특성을 평가하는데도 사용되지만, 소성가공 해석에 절대적으로 요구되는 필수 입력값으로서 사용되며 이 유효응력의 정확성은 해석의 신뢰성을 결정짓는데 매우 중요한 인자로 작용한다.

일반적으로 판재의 경우 형상적인 특성상 인장시험을 통해 유효응력을 얻는다. 인장시험에서는 네킹 (necking) 이후 국부적인 단면 변형으로 인해 네킹 전까지의 소변형률 하에서의 유효응력만을 측정할 수 있다. 따라서 소변형률에서의 유효응력을 판재의 딥 드로잉 (deep drawing) 및 아이어닝 (ironing) 등 대변형률이 요구되는 공정 해석에 적용할 경우 정확한 해석 결과를 도출하기 없기 때문에 이에 대한 다양한 연구가 시도되어 왔다.^{1,2}

따라서 본 연구에서는 인장시험을 이용하여 네킹 이후의 대변형률에서의 유효응력을 보다 정확하게 평가하기 위한 방법을 제시하였다. 네킹이 발생하기 전까지의 유효응력을 그대로 적용하고, 네킹 발생 후 대변형률에서의 유효응력은 강도계수 (strength coefficient)와 가공경화지수 (strain hardening exponent)를 가정하여 인장시험 해석에 적용하였다. 인장시험에 대한 해석 및 실험에서 얻은 하중-변위 선도를 비교하여 하중 오차가 가장 작을 때의 강도계수와 가공경화지수를 도출하였으며, 이를 이용하여 네킹 이후 대변형률에서의 유효응력을 보다 정확하게 예측할 수 있었다. 또한 본 연구에서는 연성파괴이론을 적용하여 파단이 발생할 때의 변위를 해석적으로 예측하였으며, 소재의 소둔온도에 따른 유효응력과 연성파괴지수의 변화를 고찰하였다.

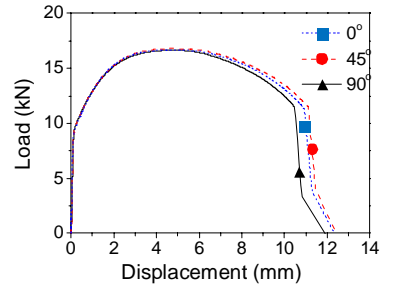
2. 인장시험

인장시험에 사용된 시편은 사각단면(50.0 mm × 12.5 mm × 8.15 mm)의 알루미늄 합금 Al6061를 사용하였다. 또한 압연방향에 대해 0, 45, 90°의 방향으로 시편을 가공하여 각 방향에 대하여 1.5 mm/s의 속도로 인장시험을 수행하였다.

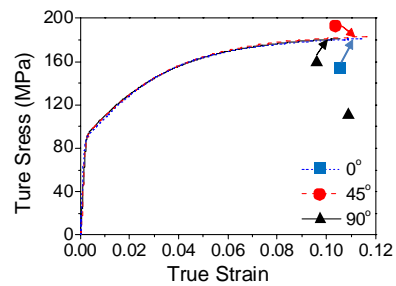
350 °C에서 소둔처리된 시편의 방향별 하중-변위 선도 및 네킹 발생 전까지의 유효응력 선도를 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 방향별 이방성은 없다고 판단되었으며, 네킹 발생 지점의 변형률은 약 0.11로서 매우 작은 변형률에서 유효응력이 유효함을 알 수 있다.

3. 유효응력 예측

앞서 인장시험에서의 유효변형률은 네킹 이전의 소변형률에서만 유효하므로 대변형률에서의 유효응력을 평가하기 위하여 본 연구에서는 유한요소해석에 의한 인장시험을 수행하고 이로부터 하중-변위 선도를 도출하였다. 유한요소해석에 사용된 시편은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 1/4 모델을 적용하였다. 지그 (jig)와 접촉하는 부분은 구속조건 (fixed condition)을, 상하 대칭면에서는 대칭경계조건 (symmetric condition)을 부여하였다. 약 57,000개의 사면체 요소를 사



(a) Load vs. displacement curves



(b) Flow stress curves

Fig. 1 Load vs. displacement and flow stress curves obtained from experimental tensile tests

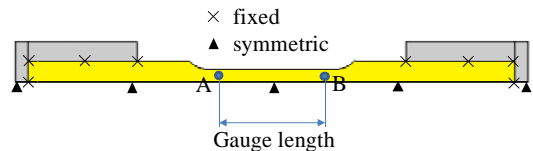


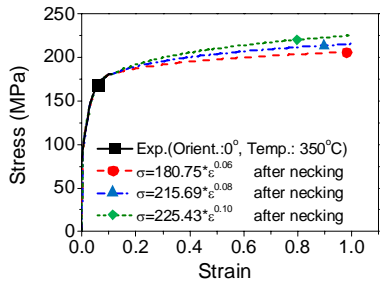
Fig. 2 Definition of gauge length and boundary conditions assigned.

용하였으며 초기 요소가 그대로 유지되도록 격자 재구성 기능은 사용하지 않았다. 또한 시편 중심에서 게이지 길이에 해당하는 두 대칭 절점 (A, B)을 선택하여 게이지 길이의 변위를 추적하였다. 네킹 이후의 대변형률에서 유효응력을 평가하기 위해 본 연구에서는 강도계수 (K) 및 가공경화지수 (n)로 정의되는 Power law를 도입하였다.

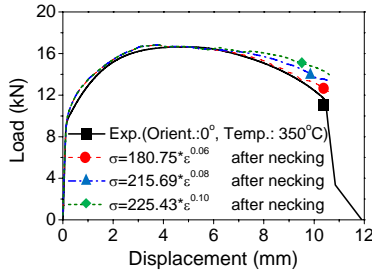
$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기에서 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 유효응력 및 유효변형률을 나타낸다.

식 (1)에서 강도계수와 가공경화지수를 가정한 유효응력을 Fig. 3(a)에 비교하였다. 이를 이용하여 인장시험 해석을 수행하여 도출된 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 강도계수 K가 약 180.75 MPa, 가공경화지수 n이 약 0.06일 때 해석에서 예측된 하중-변위 선도가 실험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 동일한 방법으로 330, 350, 370, 390, 410 °C에서 소둔처리된 알루미늄 합금의 유효응력을 도출한 결과를 Table 1에 정리하였다. 소둔온도가 증가함에 따라 강도계수는 330 °C를 제외하면 크게 차이가 없는 반면, 변형경화지수는 계속적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 소둔 온도가 증가함에 따라 변형경화지수가 증가하는 것은 소재의 성형성이 향상됨을 나타내고 볼 수 있다.



(a) Flow stress curves



(b) Load vs. displacement curves

Fig. 3 Comparison of flow stress and load vs. displacement curves obtained from simulation and experiment of tensile test

Table 1 Values of K and n predicted by simulations of tensile test

Annealing temperature (°C)	K (MPa)	n
330	287.7	0.0
350	180.8	0.06
370	209.1	0.1
390	196.6	0.13
410	192.4	0.15

4. 연성 파괴지수 예측

소성가공 중에 발생하는 소둔처리된 알루미늄 합금의 파괴는 대부분 연성파괴로서 변형한계를 초과하는 경우 발생하게 된다. 본 연구에서는 파단 예측을 위한 연성파괴모델 중 비교적 알루미늄 합금의 인장파괴에 적합하다고 알려진 식 (2)의 Normalized Cockroft-Latham 모델을 적용하여 각 소둔 온도에서 파단기준이 되는 연성파괴지수 C 를 도출하였다.^{3,4}

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma'}{d} d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

여기에서 σ' 와 $\bar{\epsilon}_f$ 는 각각 최대 인장 주응력과 파단 시의 유효변형률을 나타낸다.

이러한 연성파괴지수는 파단이 발생하는 대변형률에서 도출되므로, 인장시험 시 네킹 발생 이후의 대변형률에서의 정확한 유동응력을 평가해야만 예측 가능하다. Table 2 에 각 소둔 조건에서 열처리된 Al6061 소재의 연성파괴지수를 정리하였다. 연성파괴지수는 인장시험에서 파단이 발생하는 변위를 기준으로 예측하였다. 마찬가지로 소둔온도가 증가함에 따라 연성파괴지수 C 가 증가하는 경향을 볼 수 있다.

또한, 파단시점에서 하중이 급격히 감소하는 현상을 Table 2 의 예측된 연성파괴지수를 적용하여 인장시험 해석을 통해 모사하였다. Fig. 4 는 370 °C에서 소둔처리된 소재의 하중-변위 선도로, 연성파괴지수 1.07 을 적용한 결과 실험과 거의 동일하게 하중이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구를 통해 소둔온도가 증가함에 따라 알루미늄 합금의 성형성이 향상되는 요인을 정리하면 변형경화지수와 파단 또는 네킹이 발생하는 변형률이 증가하기 때문이며,

Table 2 Values of C predicted by simulations of tensile test

Annealing temperature (°C)	C
330	0.873
350	0.99
370	1.07
390	0.973
410	1.26

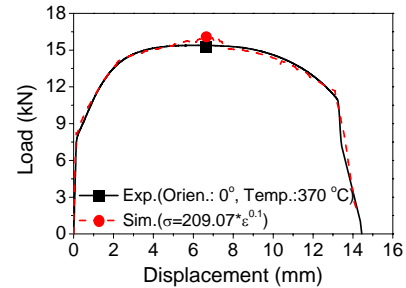


Fig. 4 Comparison of load vs. displacement curves obtained from simulation considering ductile fracture criterion and experiment of tensile test

이로 인해 연성파괴지수가 증가하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 인장시험 시 네킹 발생 후 대변형률에서의 정확한 유동응력을 평가하기 위한 방법을 제시하였으며, 이로부터 소재의 파단 기준이 되는 연성파괴지수를 도출하는 방법론에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 가공경화지수와 강도계수를 임의로 가정하여 유한요소 해석을 수행하고, 이로부터 도출된 하중-변위선도를 실험결과와 비교함으로써 대변형률에서의 유동응력을 예측할 수 있다.
- (2) 대변형률에서의 유동응력이 정확히 평가되어야만 소재의 파단기준이 되는 연성파괴지수를 정확히 예측할 수 있다.
- (3) 소둔온도가 증가하면 가공경화지수 및 연성파괴지수는 증가하여 성형성이 향상된다.
- (4) 예측된 연성파괴지수를 적용하여 인장시험 시 파단이 발생할 때의 하중이 급격히 감소하는 현상을 유한요소 해석을 통해 모사할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 중소기업청에서 시행하는 중소기업기술혁신사업(주관: 삼우기업㈜)의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Tian, H. B. and D. Kang, "A study on determining hardening curve for sheet metal," International Journal of Machine Tools and Manufacture, **43**, 1253-1257, 2003.
2. Zhang, Z. L., Hauge, M., Ødegård, J., and Thaulow, C., "Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section," International Journal of Solid and Structures, **36**, 3497-3516, 1999.
3. Park, J.J. and Lee, Y.S., "A review of ductile fracture criteria for forming processes," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, **21**, 1021-1029, 1997.
4. Wierzbicki, T., Bao, Y., Lee, Y.W., and Bai, Y., "Calibration and evaluation of seven fracture models," International Journal of Mechanical Sciences, **47**, 719-743, 2005.